

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV AUTOMATIZACE A MĚŘICÍ TECHNIKY

DEPARTMENT OF CONTROL AND INSTRUMENTATION

NOVÉ NETRADIČNÍ POHONY

NEW UNCOMMON ACTUATORS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Jan Novotný

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Lukáš Kopečný, Ph.D.

BRNO 2021

Bakalářská práce

bakalářský studijní program **Automatizační a měřicí technika**

Ústav automatizace a měřicí techniky

Student: Jan Novotný

ID: 203397

Ročník: 3

Akademický rok: 2020/21

NÁZEV TÉMATU:

Nové netradiční pohony

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

- 1) Udělejte rešerši vývoje netradičních pohonů během posledních 10 let.
- 2) U vybraného pohonu popište fyzikální princip a pokuste se sestavit zjednodušený matematicko-fyzikální model.
- 3) Pokuste se o realizaci zvoleného netradičního pohonu.
- 4) Ověřte funkčnost pohonu, zhodnotte dosažené výsledky.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

FORCE AND TOUCH FEEDBACK FOR VIRTUAL REALITY, by Grigore C. Burdea, J. Wiley, New York, 1996, xiv+339 pp, ISBN 0-471-02141-5 . 2019-09-17]. ISSN 0263-5747.

Termín zadání: 8.2.2021

Termín odevzdání: 24.5.2021

Vedoucí práce: Ing. Lukáš Kopečný, Ph.D.

doc. Ing. Václav Jirsík, CSc.
předseda rady studijního programu

UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

Abstrakt

Práce obsahuje seznam vybraných nových nekonvenčních pohonů, které se objevily za posledních 10 let, matematicko-fyzikální model 3D-Elastomerového pohonu, jeho konstrukci a testování. Seznam je rozdělen podle principu a typu na 6 kategorií a sice pohony pneumatické, hydraulické, měkké, piezoelektrické, mikro/nano a s tvarovou pamětí. Konstrukce pohonu využívá 3D tisknu a odlévání silikonu k sestrojení měkkého pneumatického pohonu se třemi stupni volnosti ohybu. Pohon je následně testován na ohyb a prodloužení.

Klíčová slova

pneumatické pohony, měkké aktuátory, pohony z materiálu s tvarovou pamětí, mikro/nano aktuátory, piezoelektrické pohony, 3D tisk, odlévání silikonu, tři stupně volnosti

Abstract

This report contains a list of new chosen uncommon actuators that emerged in the last 10 years, mathematical model of 3D-Elastomer actuator, construction and testing of 3D-Elastomer actuator. The list is divided by the principle and the type to 6 categories, which are pneumatic actuators, hydraulic actuators, soft actuators, piezoelectric actuators, micro/nano actuators and shape memory actuators. The construction of actuator is using 3D printing technology and silicone molding to build soft pneumatic actuator with three degrees of freedom of bending. Actuator is then tested for its elongation and bending parameters.

Keywords

Pneumatic actuator, soft actuator, shape memory actuators, micro/nano actuators, piezoelectric actuators, 3D printing, silicon molding, three degrees of freedom

Bibliografická citace

NOVOTNÝ, Jan. *Nové netradiční pohony*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav automatizace a měřicí techniky, 2021. 35 s. Bakalářská práce. Vedoucí práce: Lukáš Kopečný.

Prohlášení autora o původnosti díla

Jméno a příjmení studenta:	<i>Jan Novotný</i>
VUT ID studenta:	<i>203397</i>
Typ práce:	<i>Bakalářská práce</i>
Akademický rok:	<i>2020/21</i>
Téma závěrečné práce:	<i>Nové netradiční pohony</i>

Prohlašuji, že svou závěrečnou práci jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucí/ho závěrečné práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené závěrečné práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této závěrečné práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne: 24.5.2021

podpis autora

Poděkování

Děkuji vedoucímu bakalářské práce Ing. Lukáši Kopečného, Ph.D. za pedagogickou a odbornou pomoc a další rady při zpracování bakalářské práce. Dále bych chtěl poděkovat společnosti DAWEX CHEMICAL s.r.o. za poskytnutí silikonového materiálu a panu Lukáši Růženci za technickou pomoc při práci se silikonem.

V Brně dne: 24.května 2021

podpis autora

Obsah

SEZNAM OBRÁZKŮ	8
ÚVOD	10
1. LITERÁRNÍ REŠERŠE	11
POHONY Z TVAROVÉ PAMĚTI	11
1.1 SMA POHONY	11
1.1.1 Drátový SMA pohon [2].....	12
1.2 SMP POHONY	12
1.2.1 Vícevrstvý paměťový polymer-kovový kompozitní pohon [4].....	13
1.2.2 Autonomní programovatelný pohon [5].....	14
1.2.3 Polyuretanový paměťový pohon [6].....	15
1.3 MSM POHONY.....	15
1.3.1 MAGNETOSHAPE [9]	16
MĚKKÉ POHONY.....	17
1.4 MODEL JÍCNU [10].....	17
1.5 PNEUMATICKÝ LIDSKÝ PRST [11]	17
1.6 ELASTOMEROVÝ POHON [12]	18
1.7 FLEXIBILNÍ POHON Z TEPELNÉ FOLIE [13].....	19
1.8 POHON VYUŽÍVAJÍCÍ PIEZOELEKTRICKÝ CHIRÁLNÍ POLYMER [14].....	19
1.9 POHON VYUŽÍVAJÍCÍ PLASTOVÉ FÓLIE [15]	20
HYDRAULICKÉ POHONY.....	22
1.10 PIEZOELEKTRICKÝ / ER HYBRIDNÍ HYDRAULICKÝ KROKOVÝ POHON [16].....	22
PNEUMATICKÉ POHONY.....	23
1.11 FLEXIBILNÍ SFÉRICKÝ POHON [17]	23
1.12 GUMOVÝ PNEUMATICKÝ POHON [18]	24
1.13 TENKÝ GUMOVÝ PNEUMATICKÝ POHON [30].....	24
PIEZOELEKTRICKÉ POHONY.....	26
1.14 PIEZOELEKTRICKÝ POHON Z TENKÉHO FILMU OVLÁDANÝ UV SVĚTLEM [31]	26
1.15 PIEZOELEKTRICKÝ OVLÁDANÝ POHON PRO MIKROSKOPICKÉ ČOČKY [19]	27
1.16 PARAZITNÍ TYP PIEZOELEKTRICKÉHO POHONU [20].....	27
1.17 SEBE SNÍMACÍ PIEZOELEKTRICKÝ POHON [21]	28
1.18 JEDNO PÓLOVÝ LINEÁRNÍ PIEZOELEKTRICKÝ POHON [22]	29
MIKRO / NANO POHONY.....	30
1.19 OHEBNÝ VIBROTAKTILNÍ POHON [23].....	30
1.20 FLEXIBILNÍ PNEUMATICKÝ KROUTÍCÍ POHON [24]	30
1.21 DNA ORIGAMI NANO POHON [25].....	31
1.22 DVOUROZMĚRNÝ PNEUMATICKÝ POHON [26].....	32
1.23 DVOUVRSTVÝ PIEZOELEKTRICKÝ/ELEKTROSTRIKČNÍ KUPOLOVITÝ UNIMORPH [27]	33
2. PRINCIP A MATEMATICKO-FYZIKÁLNÍ MODEL.....	34

2.1	MATEMATICKO-FYZIKÁLNÍ MODEL	34
3.	KONSTRUKCE	38
3.1	MODELOVÁNÍ.....	38
3.2	SESTAVENÍ	39
4.	TESTOVÁNÍ ELASTOMEROVÉHO POHONU	42
	ZÁVĚR	44
	LITERATURA.....	45
	SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK	48
	SEZNAM PŘÍLOH.....	49

SEZNAM OBRÁZKŮ

1.1	Základní změna fází v SMA materiálech [1].....	11
1.2	SMA pohon pro květinového robota	12
1.3	Molekulární mechanismus na teplo reagující efekt paměti tvaru [3]	13
1.4	Programování MSMPMC: a) originální tvar b) zahřátí na 85°C a ochlazení na 70°C c) zahřátí na 60°C a ochlazení na 20°C.....	13
1.5	Deformace MSMPMC pohonu	14
1.6	Autonomní pohon.....	14
1.7	Dva designy navrhovaných SMPU obvodů.....	15
1.8	Změna stavů v MSM slitinách [8].....	16
1.9	MAGNETOSHAPE Push-Push pohon.....	16
1.10	Koncept modelu	17
1.11	Design pneumatického prstu	18
1.12	Struktura elastomerového pohonu. 1) Obal 2) Vlákna omezující vrstva 3) Zástrčka sytiče 4) Rychlospojka 5) Vzduchová trubice 6) Těsnící kryt 7) Těsnící vrstva 8) Spojovací blok	18
1.13	Design pohonu s tepelnou fólií.....	19
1.14	Ultrasonický motor při AC napětí 350 V a frekvenci 9 kHz.....	20
1.15	Konstrukce P-ELSA pohonu	21
1.16	Model P-ELSA pohonu	21
1.17	Sférický pohon	23
1.18	Gumový pneumatikcký pohon. Horní je pro malíček spodní je pro zbytek prstů.	24
1.19	Tenký gumový pneumatikcký pohon, šířka 6 mm, hloubka 2.6 mm a délka 50 mm	25
1.20	Princip měření a deformace piezoelektrického pohonu z tenkého filmu ovládaného UV světlem ...	26
1.21	Rozložení piezoelektrických pohonů bez integrace objektivu	27
1.22	Schématiký model parazitního piezoelektrického pohonu	28
1.23	Model sebe snímajícího lineárního pohonu.....	29
1.24	Jedno pólový lineární motor.....	29
1.23	Model vibrotaktilního pohonu	30
1.24	Deformace flexibilního pneumatikckého pohonu	31
1.25	Nano zařízení regulující interakci mezi dvěma nákladními molekulami	32
1.26	Princip posunu.....	32
1.27	BIPEDU při vlivu elektrického pole	33
2.1	Rozměry elastomerového pohonu	36

2.2	Rozměry oblouku v elastomerovém pohonu	37
3.1	Formy k odlití pístů a celého pohonu (vlevo), stojan pohonu, rychlospojky s redukcemi, nylonové vlákno a zaklapávací centrování (vpravo).....	38
3.2	Složená forma pro odlití těla pohonu	39
3.3	Píst s vyměňným středem a obalem s nylonového vlákna.....	40
3.4	Odlevání záslepky vrchu pohonu a přilepení redukcí s rychlospojkami	41
3.5	Odlití těla pohonu.....	41
4.1	Sestavený elastomerový pohon	43

ÚVOD

Akční člen, pohon či aktuátor je součástí stroje zodpovědná za pohyb mechanismu, kdy převádí informaci systému na mechanickou práci a vyžaduje ke své činnosti řídicí signál a zdroj energie. Jsou to součástky s velkou variací rozdělení, záležící na typu fyzikální manipulace pohonu. Můžeme je rozdělit na, pneumatické, elektrotechnické, hydraulické a nekonvenční jako jsou piezoelektrické, mikro a další.

Mezi první požadavky na pohony byla hlavně jejich rychlost, preciznost a efektivita. V dnešní době však podle typu aplikace vzrostly i požadavky na inteligenci, sílu a bezpečnost pro lidem bezpečné roboty, poměr velikost výkon pro mikro a nano aktuátory, či na silikonové typy koster a kloubů pro měkké pohony a roboty. Velká žádost je taky o kompaktní pohony zvládající pohyb se třemi stupni volnosti, zvláště v odvětví měkkých pohonů pro roboty a zdravotnická zařízení. S rozvojem technologií např. MEMS, MOEMS a 4D tisk a nových materiálů se otvírají možnosti nových pohonů využívajících těchto technologií a jejich následná aplikace od řízení ventilu po užití ve vesmírných sondách a sebe stavějících obydlí pro kosmonauty.

Cílem této práce je vytvořit rešerši nekonvenčních pohonů, jenž vznikly za posledních 10 let a sestavit matematicko-fyzikální model pro vybraný elastomerový pohon, který byl vybrán z nových nekonvenčních pohonů. Pohon následně zkonstruovat za pomoci 3D tisku a odlévání silikonu a otestovat, zda splňuje zmíněné předpoklady. Jednotlivé části jsou rozděleny do kapitol, přičemž rešerše nových nekonvenčních pohonů je v kapitole 1, kapitola 2 obsahuje matematicko-fyzikální model a princip měkkého elastomerového pohonu, v kapitole 3 je popsána konstrukce měkkého elastomerového pohonu a kapitola 4 obsahuje testování a shrnutí výsledků bakalářské práce.

1. LITERÁRNÍ REŠERŠE

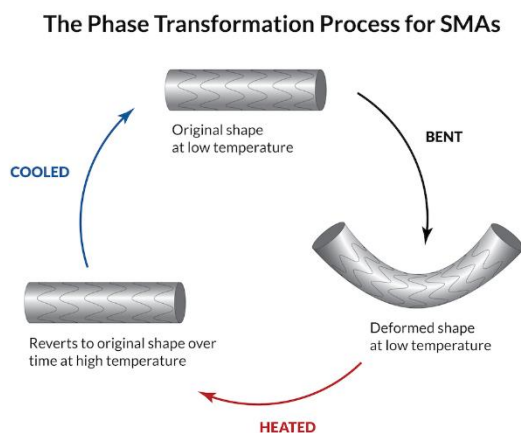
POHONY Z TVAROVÉ PAMĚTI

Tvarová paměť popisuje jev, kdy při zahřátí plasticky deformovaného materiálu se daný materiál vrátí zpět do originální podoby. Tyto dva stavy materiálu se nazývají martenzit a austenit, přičemž martenzit je krystalická struktura materiálu za nižších teplot a austenit je struktura při teplotě vyšší jak A_s . Tento jev byl objeven počátkem 40. let 20. století, ale větší zájem a rozvoj byl až v 60. letech 20. století při pozorování tohoto efektu na slitině NiTi. Tvarová paměť se projevuje i u slitin se zinkem, zlatem, mědí a železem. Tyto slitiny se však nevyužívají, přestože jsou dostupnější, jelikož nesplňují požadavky na stabilitu a tepelně mechanickou výkonost.

Tento jev je velice praktický a dobrou alternativou pro běžné pohony jako je hydraulika, pneumatika a elektrické motory. V dnešní době rozlišujeme tři velké skupiny materiálů s tvarovou pamětí a sice slitiny s tvarovou pamětí (SMA), polymery s tvarovou pamětí (SMP) a slitiny magnetické paměti tvaru (MSM).

1.1 SMA pohony

SMA materiály mají dva hlavní stavy martenzit a austenit. Austenit je krystalická struktura při teplotách vyšších jak A_s a martenzit je struktura při nízkých teplotách. Průběh deformace a vrácení se do výchozího stavu je viditelný na obrázku 1.1. Vratná deformace u těchto materiálů dosahuje až 15 % a je jednou z velkých předností těchto kovů. Pro porovnání běžné kovy mají do 1 % vratnou deformaci. Nevýhodou SMA je rychlá únava materiálu, pomalý přechod z jedné fáze do druhé u některých materiálů a nestabilita při přechodu z martenzitu do austenitu, tj. při zahřívání [1].

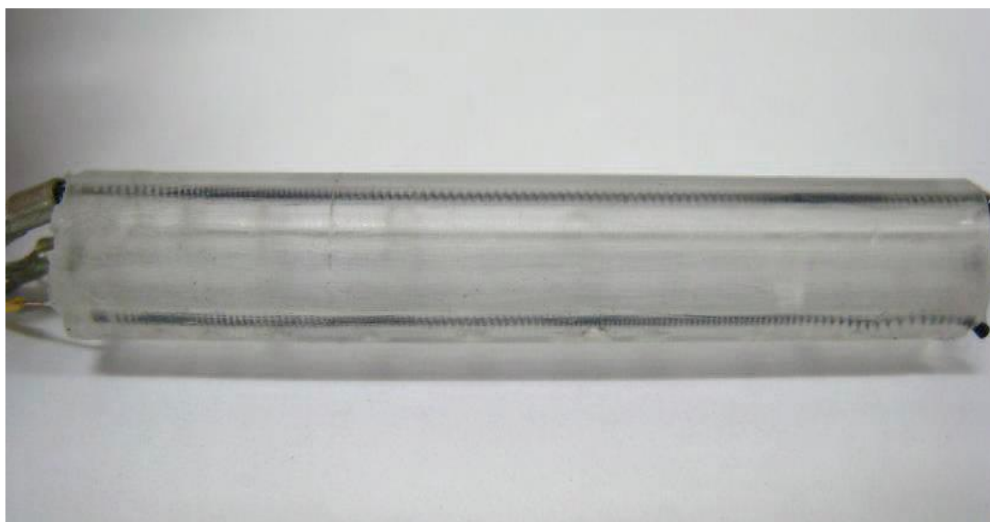


Obrázek 1.1 Základní změna fází v SMA materiálech [1]

SMA pohony mají využití v letectví a kosmonautice, kde probíhá vývoj křídla, jenž by bylo schopno se ohýbat i za letu ve vertikálním rozsahu $\pm 90^\circ$. V automobilovém průmyslu se SMA pohony využívají k méně náročnému otevírání kufru u auta nebo k redukci hluku a vibrační motoru.

1.1.1 Drátový SMA pohon [2]

Na obrázku 1.2 vidíme model SMA pohonu, který vznikl za účelem vyzkoušení kompaktního pohonu s vysokým výkonem s využitím MEMS technologií. Pohon byl nejdříve nasimulován a teoreticky spočítán a následně zkonstruován a otestován. Pohon

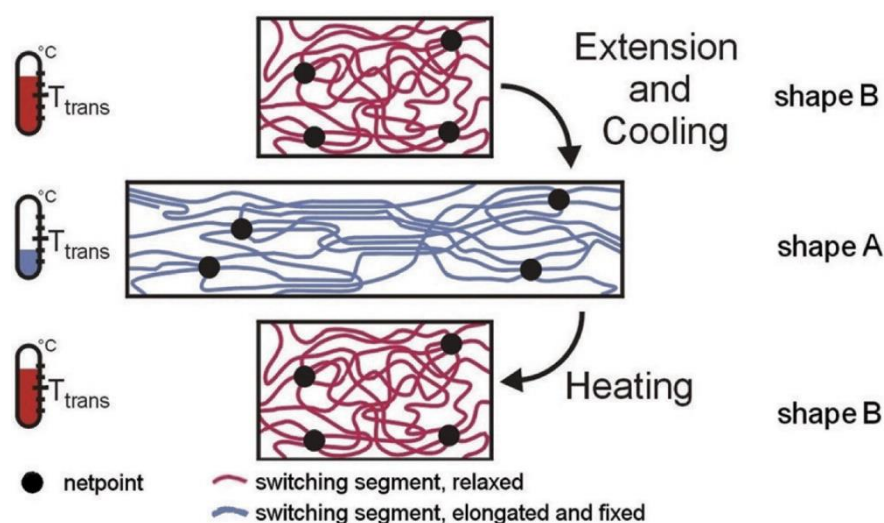


Obrázek 1.2 SMA pohon pro květinového robota

se skládá ze tří SMA drátů v gelovém válci. Potřebná počáteční teplota pro austenit je $A_s = 328 \text{ K}$ a koncová $A_f = 373 \text{ K}$. Jednotlivé konce jsou připojeny na napětí v rozsahu $U = 1,3 - 1,9 \text{ V}$. Materiálem následně protéká proud, který generuje žádané teplo pro stáhnutí či roztáhnutí. Délka jednotlivého drátu je 50 mm a byla pro něj využita SMA slitina MX200 TiNi.

1.2 SMP pohony

Polymery s tvarovou pamětí se řadí mezi aktivní polymery, které jsou schopny mít dva tvary. Polymery s tvarovou pamětí mění mezi tvarem A a B v závislosti na vnějších podnětech. Přičemž tvar A je získán mechanickou deformací materiálu a následnou fixací té deformace a tvar B je originální tvar materiálu [3]. Vnější podněty, na které polymer reaguje, může být teplo, světlo, magnetické pole, elektrické pole či chemický roztok a spousta dalších. Záleží na účelu použití. Polymery s tvarovou pamětí jsou elastické sítě polymeru se spínači reagující na požadovaný podnět. Molekulární mechanismus efektu paměti tvaru můžeme vidět na obrázku 1.3.

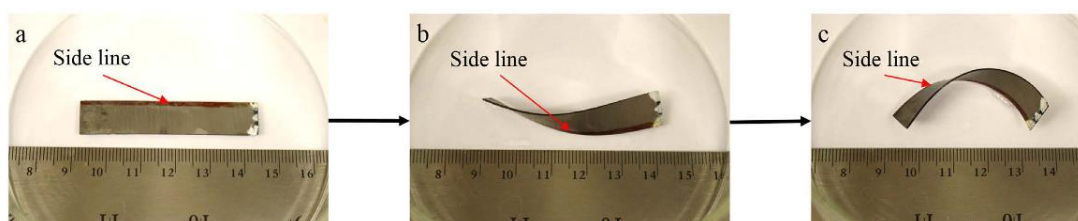


Obrázek 1.3 Molekulární mechanismus na teplo reagující efekt paměti tvaru [3]

Polymery s tvarovou pamětí se vyskytují v mnoha různých odvětvích. Můžeme je najít v chytrých látkách, implantátech, vesmírných vozidlech a další. Velkou výhodou oproti slitinám s tvarovou pamětí je jejich několika násobně menší hmotnost, což umožňuje širší užití.

1.2.1 Vícevrstvý paměťový polymer-kovový kompozitní pohon [4]

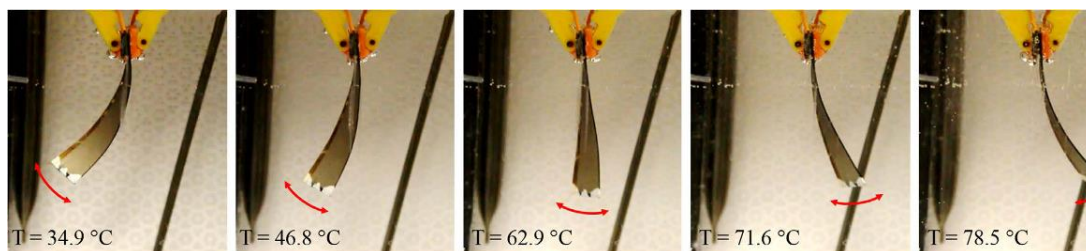
Jedná se o iontový polymer-kovový kompozitní pohon (MSMPMC) inspirovaný v pohybu tvorů a rostlin v přírodě, jenž má několik pozic, do kterých se může pomocí paměťového efektu dostat. Pohon vyrobený z materiálu Nafion je schopen komplexních pohybů a je ovládán pouze dvěma vstupy, a to elektrickým a teplotním. Na obrázku 1.4 můžeme vidět programování pohonu. Následně byl pohon testován v destilované vodě, která byla zahřívána z 20°C na 90°C a byl napájen střídavým napětím 3,7 V s frekvencí 1 Hz. Výsledný pohyb je k vidění na obrázku 1.5. MSMPMC se



Obrázek 1.4 Programování MSMPMC: a) originální tvar b) zahřátí na 85°C a ochlazení na 70°C c) zahřátí na 60°C a ochlazení na 20°C

zvládl ohýbat zleva doprava a zpět a zároveň se i kroutil po směru hodinových ručiček. Výhodou tohoto pohonu je jeho kompaktnost, jeho délka je 51,88 mm, šířka 10,49 mm a tloušťka 0,60 mm, což jej činí několika násobně menší oproti pneumatickým a

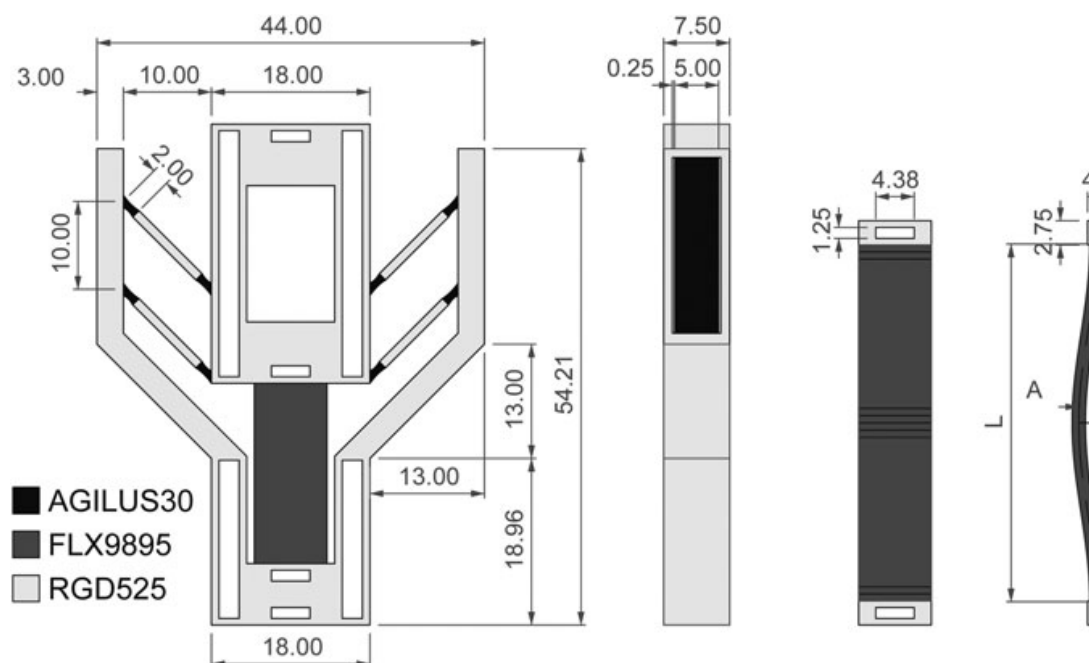
hydraulickým pohonům s komplexními mechanickými systémy.



Obrázek 1.5 Deformace MSMPMC pohonu

1.2.2 Autonomní programovatelný pohon [5]

Autonomní programovatelný pohon využívající bistability a SMP technologií vznikl pro využití v autonomní stavbě budov a jiných objektu v kosmu, kde je požadavek malý objem ve složeném stavu a lehký ale zároveň spolehlivý. Pohon a použité materiály vidíme na obrázku 1.6.



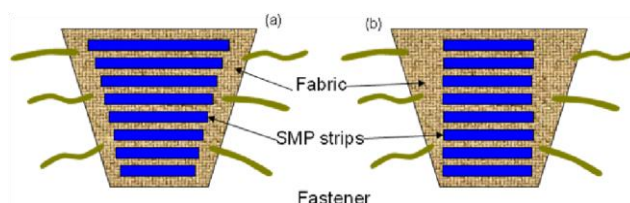
Obrázek 1.6 Autonomní pohon

Ke konstrukci se využilo nového 4D tisku. Pohon reaguje na změny teploty v prostředí, ve kterém se nachází. Jednotlivé pohony jsou sestaveny do čtvercového designu, který se při zahřátí na 40 °C rozloží do pyramidové struktury. Po ochlazení zůstává zamknut v poloze a složí se pouze po opakovaném zahřátí. Konstrukce je schopna udržet hmotnost ekvivalentní 0,430 N hned po rozložení a po ochlazení na provozní teplotu, která je 22 °C,

je schopna udržet hmotnost ekvivalentní 1,70 N. Aktivační a provozní teplota se dá modifikovat chemickým složením materiálu a jeho délkou a tloušťkou.

1.2.3 Polyuretanový paměťový pohon [6]

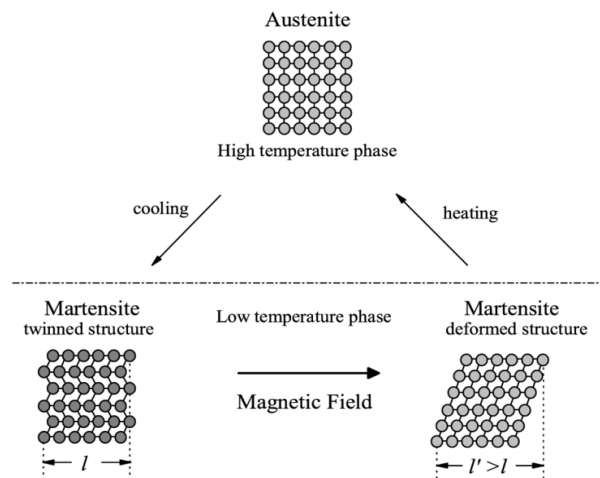
Polyuretanový paměťový pohon (SMPU) byl navrhnout a použit pro nový typ tlakového obvazu na nohu s různou silou stisku podle části nohy kde se nachází k léčbě varixů. Obvaz má v látce pruhy SMPU pohonu viz obrázek 1.7, které reagují v nízkých teplotách okolo 50 °C a jsou schopny vyvinout tlak až 5300 Pa. Pohon je vyroben z polykaprolaktonu (PCL -2000), který je použit na měkké části a kombinace 4,4'-difenylnmethan diisokyanát (MDI) a isoforon diisokyanát (IPDI). Provedené testy opakovatelnosti stažení měli pouze malý ubytok maximálního tlaku a potvrdili možnost dlouhodobého použití při léčbách vředů.



Obrázek 1.7 Dva designy navrhovaných SMPU obvazů

1.3 MSM pohony

MSM slitiny jsou feromagnetické materiály, převážně slitina Ni-Mn-Ga, které jsou schopny vyvinout sílu a pohyb při vlivu běžného magnetického pole a pro vrácení do původního stavu stačí otočit magnetické pole o 90° nebo použít pružinu [7]. Tento jev je však pouze přítomen v martenzitovém stavu slitiny viz obrázek 1.8, při přechodu do austenitu jev se ztrácí. Z toho plyne, že MSM slitiny se dají aktivovat i teplotou. Slitiny dosahují vysokých rychlostí cyklů, okolo 1-2 kHz a používají se jednak pro pohony ale také pro sensory, k tlumení vibrací či jako pojistka v magnetickém poli.



Obrázek 1.8 Změna stavů v MSM slitinách [8]

1.3.1 MAGNETOSHAPE [9]

Společnost ETO GROUP vyvinula novou technologii MAGNETOSHAPE, která nabízí monostabilní, bistabilní a multi-stabilní pohony pro různá použití. Tuto technologii následně použili k vyvinutí nového pohonu Push-Push viz obrázek 1.9, ve kterém jsou



Obrázek 1.9 MAGNETOSHAPE Push-Push pohon

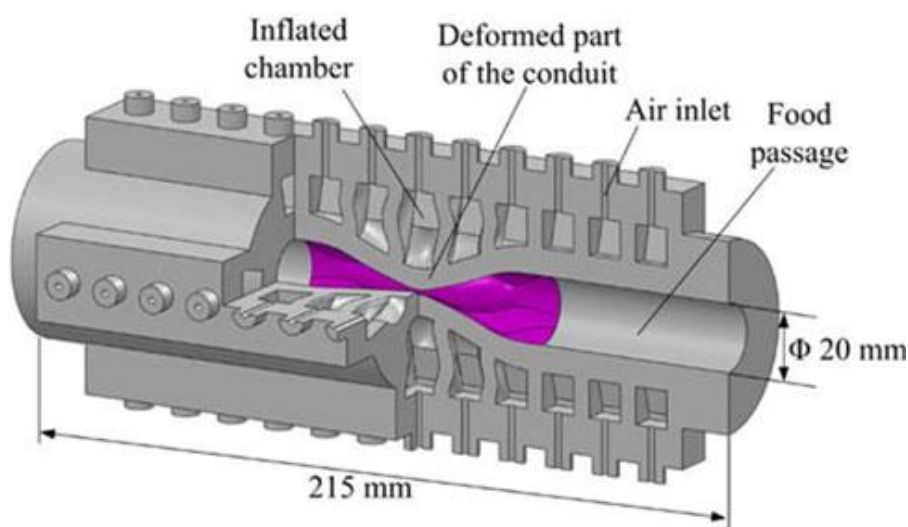
dva MSM pohony pracující proti sobě, což umožňuje větší stabilitu při udržování zavřeného ventilu než pružina. Možností je použít i hybrid se solenoidem, kdy se jeden MSM pohon vymění za solenoid. Tento hybrid bude následně mít větší rychlost a bude úspornější a levnější.

MĚKKÉ POHONY

Měkké pohony jsou pohony určené hlavně pro měkkou robotiku. Jsou to pohony vyráběné z látek podobných v živých organismech a musí se obejít bez pevných částí jako ocelové kryty atd. aby byly co nejvíce flexibilní. Dělí se podle podnětu, který je řídí a ty mohou být elektrické, tepelné, magnetické, reagující na světlo tlak či exploze.

1.4 Model jícnu [10]

Z důvodů obtížného až nemožného pozorování průběhu polykání jídla u člověka s dysphagií, byl navrhnut model jícnu, který je schopen napodobovat cestu jídla jícnem. Model je vytvořen ze silikonového válce, který je z venku pevný a má vzduchové komory ve stěnách, které jsou schopny se roztáhnout dovnitř a simulovat vlnu tlačící jídlo jícnem viz obrázek 1.10. Po testování, splňovali výsledky podmínky pro měkké roboty. Model je stále třeba zdokonalit a postavit geometricky přesný model.

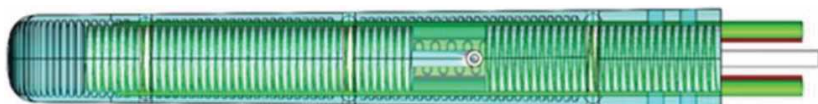


Obrázek 1.10 Koncept modelu

1.5 Pneumatický lidský prst [11]

Jelikož v dnešní době robotické ruce a drapáky nedosahují přesnosti a tuhosti lidského prstu byl vyvinut nový pneumatický prst se třemi klouby a proměnou tuhostí díky slitinám s nízkým bodem tání (LMPA). Model prstu je na obrázku 1.11 a konstrukce byla provedena pomocí formy vytvořené 3D tiskem, do které se následně vložil Ni-Cr drát,

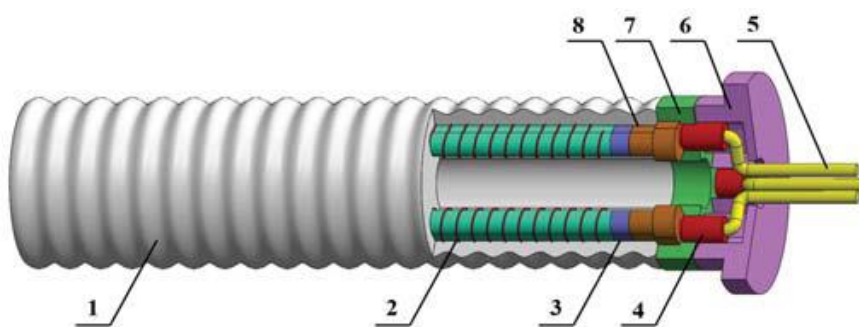
vzduchové komory ze silikonu Ecoflex–50 a na konec zalito silikonovou gumou. Pneumatický prst má dva klouby, které pracují zároveň a jeden nezávislý na nich, stejně jako lidský prst. Tím se dosáhlo pohybu jak u lidského prstu. Jednotlivé klouby jsou schopny se ohnout přes 45° a vyvinout ohybový moment o velikosti 6,8 Nmm. Pomocí LMPA se dá korigovat tuhost prstu, ale pouze velmi pomalu.



Obrázek 1.11 Design pneumatického prstu

1.6 Elastomerový pohon [12]

Je to nový typ pohonu, který je inspirovaný strukturou těla medúzy a červů. Tělo tvoří trubice ze silikonového gelu, ve kterém jsou po délce trubice tři vzduchové komory využívající vzduch nebo kapalinu jako medium. Pohon je vyroben z Akrylonitrilbutadienstyrenu (ABS) a z elastického křemičitého gelu Silicone Sealant 732, Dow Corning Corp. Model je na obrázku 1.12 a je vyroben čtyř stupňovým procesem



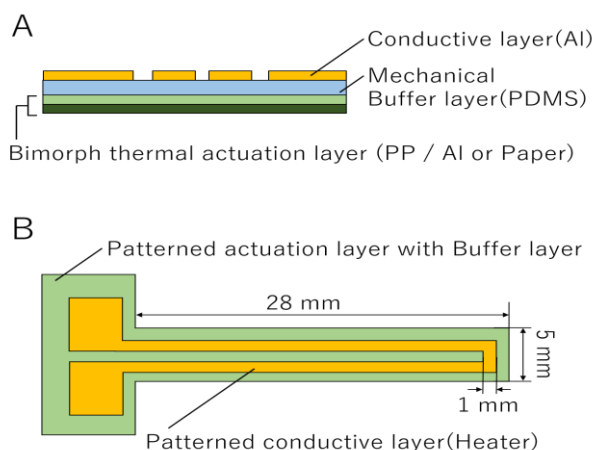
Obrázek 1.12 Struktura elastomerového pohonu. 1) Obal 2) Vlákný omezující vrstva 3) Zástrčka sytiče 4) Rychlospojka 5) Vzduchová trubice 6) Těsnící kryt 7) Těsnící vrstva 8) Spojovací blok

formování, kdy se nejdříve začíná vnitřními dutinami a postupně se přidávají vrstvy

elastomeru a silikonového gelu, který se používá v tvrdosti 15 a 45 HA. Tlak se ovládá pomocí tří solenoidových ventilů typu SMC ITV003-2BL. Při zvednutí tlaku v jedné nebo či dvou komorách trubice se začne ohýbat směrem nejmenšího tlaku. Pohon se zvládne prodloužit až o 23,6 % a dosáhnout úhlu ohnutí 80°.

1.7 Flexibilní pohon z tepelné folie [13]

Pohon je cílený pro monolitické mikroskopické roboty schopné samo opravy. Pohon je vyroben z tepelné folie, která zároveň slouží i jako pružina a kostra a skládá se z vodivé vrstvy, mechanické vyrovnávací vrstvy a bimorph tepelné vrstvy viz obrázek 1.13. Pohonná bimorph vrstva byla složena z polypropylenu a papíru nebo polypropylenu a hliníkové folie. Model měl posun 4,5mm bez zátěže a se zátěží 0,3 g měl stejné výsledky při řídicím napětí 2 V a frekvenci 1 Hz. Při použití laserového řezání či foto litografie, je možné vyrobit mikro robota bez jakéhokoliv skládání a elektrické instalace.



Obrázek 1.13 Design pohonu s tepelnou fólií

1.8 Pohon využívající piezoelektrický chirální polymer [14]

Pro ultrasonické motory se využívá PZT keramik. Ty jsou však složitější na výrobu a použití. Z tohoto důvodu by bylo lepší používat piezoelektrický chirální polymer, který se získává z rostlin jako průmyslová surovina. K využití piezoelektrického chirálního polymeru jako pohonu pro ultrasonické rotační motory však bylo nejdříve zapotřebí snížit obsah izomeru ve fólii, jelikož negativně ovlivňuje piezoelektrickou konstantu. Z chemicky upravené fólie se srolovala trubička o průměru 10 mm a délce 100

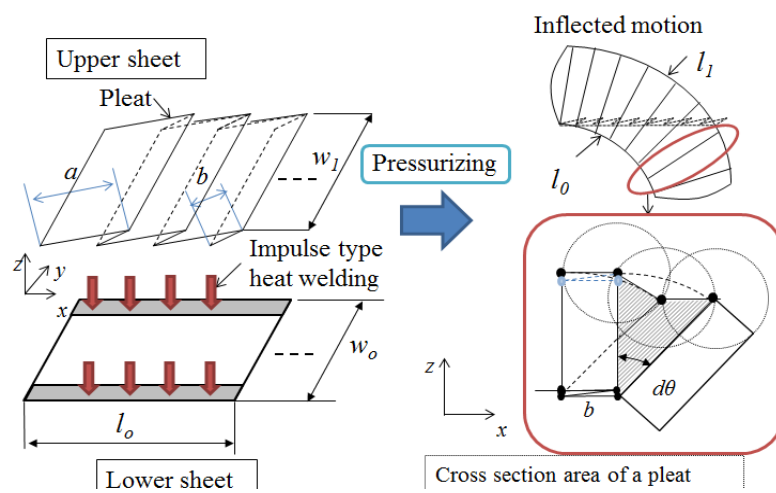
mm. Na její vrchol se položil míček viz obrázek 1.14, který se po připojení střídavého napětí 350 V a frekvenci 9,2 kHz na elektrody fólie roztočil rychlostí 200 otáček za minutu proti směru hodinových ručiček a po směru hodinových ručiček při stejném napětí a frekvenci 7,97 kHz.



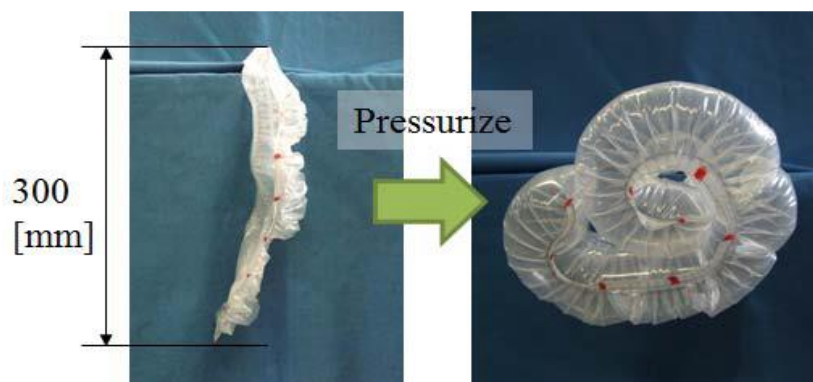
Obrázek 1.14 Ultrasonický motor při AC napětí 350 V a frekvenci 9 kHz

1.9 Pohon využívající plastové fólie [15]

Jedná se o extrémně lehký pohon, nazývaný též P-ELSA, využívající neelastické plastové fólie, která je skládaná podobně jako origami a jako možná náhrada gumových pneumatických pohonů. Pohon je složen z dvou vrstev, které jsou spájeny pouze na okrajích a horní vrstva je skládaná viz obrázek 1.15. Různé směry se docílí jiným typem přeložení horní plastické fólie či vynecháním překladů v určitých místech. Je schopen pracovat již s tlakem 10 kPa a je schopen vyvinout točivý moment 0,6 Nm. Pro obousměrný pohyb stačí spojit dva P-ELSA k sobě, aby pracovali proti sobě a směr se udává tlakem v nyní ve dvou vzduchových komorách. Možným využitím je i pro podvodní roboty. Model pohonu vidíme na obrázku 1.16. Nevýhodou konstrukce je malá opakovatelnost kvůli vysoké únavě přehybů fólie.



Obrázek 1.15 Konstrukce P-ELSA pohonu



Obrázek 1.16 Model P-ELSA pohonu

HYDRAULICKÉ POHONY

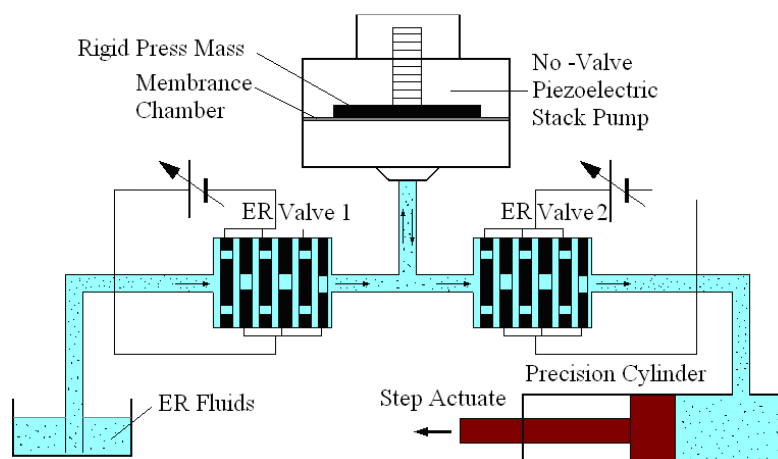
Hydraulické pohony využívají k činnosti pracovní kapalinu, která získává tlakovou energii z hydrogenerátoru, jenž přeměňuje mechanickou energii na tlakovou. Mechanickou energii zpravidla dodává elektromotor. Použití se člení podle výstupu na pohony rotační, lineární či kyvné.

Mezi kapaliny možné k použití patří i magnetoreologické (MR) a elektoreologické kapaliny, jinak nazývány i inteligentní kapaliny, při vystavení magnetickému/elektrickému poli jsou schopny měnit svoji viskozitu až do momentu kdy se získávají viskoelastické vlastnosti.

Mezi výhody hydraulických pohonů patří jejich jednoduchost, relativně velký výkon i při malých rozměrech a možnost využití v nebezpečných prostředích. Nevýhodami je, že spolehlivost silně závisí na viskozitě kapaliny a na okolní teplotě.

1.10 Piezoelektrický / ER hybridní hydraulický krokový pohon [16]

ER hybridní pohon je prototyp využití několika vrstvé bezventilové piezoelektrické pumpy a rychle reagující ER kapaliny regulované pomocí dvou ER ventilů. Pohon je schopen vysoké rychlosti krokování pístu s velkou přesností. Výstup a přesnost je závislá na typu pístu, a je tedy možné jen přizpůsobit různým aplikacím. Pohon byl zveřejněn roku 2010 a byl stále ve vývojové fázi. Předpokládané užití je mikro elektronice, měřicí přístroje a pro roboty. Princip pohonu je na obrázku.

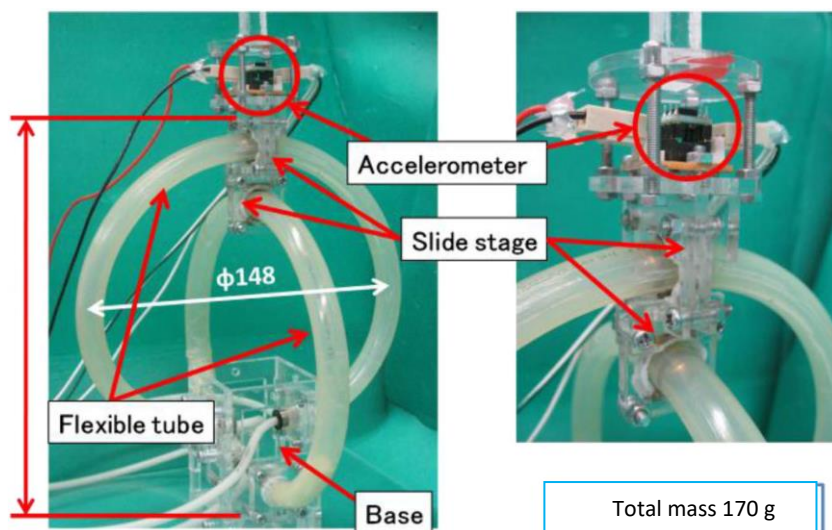


PNEUMATICKÉ POHONY

Pneumatické pohony využívají energie stlačeného vzduchu, který je do systému dodáván kompresorem a stlačen na požadovaný tlak. Před výstupními komponentami je tlak ještě regulován dle potřeby. Výhodami pneumatických pohonů je jejich rychlost a možnost využití prostředích s nebezpečím výbuchu. Mezi nevýhody patří vysoké nároky na čistotu vzduchu, aby nedocházelo ke kondenzaci vody v rozvodech. V kapitole jsou uvedeny dva příklady pneumatických pohonů vyvinutých za posledních 10 let.

1.11 Flexibilní sférický pohon [17]

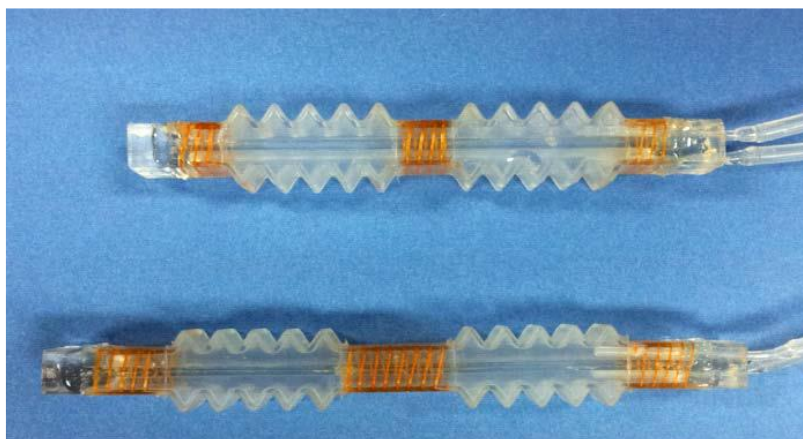
Pohon se skládá ze dvou kruhových flexibilních pneumatických pístů, které se kříží pod pravým úhlem na základně a jsou regulovány dvěma flexibilními pneumatickými ventily viz obrázek 1.17. Přivedením tlaku to pneumatického pístu se posune konstrukce na vrchu v opačném směru. Řízení pohonu je zajištěno pomocí master-slave využívající akcelerometru, microcontrolleru a quasi-servo ventilu. Pohon je schopen vyvinout krouticí moment 0,36 Nm v ose x a 0,50 Nm v ose y. Osa x je spodní kruhový píst a osa y je horní kruhový píst.



Obrázek 1.17 Sférický pohon

1.12 Gumový pneumatický pohon [18]

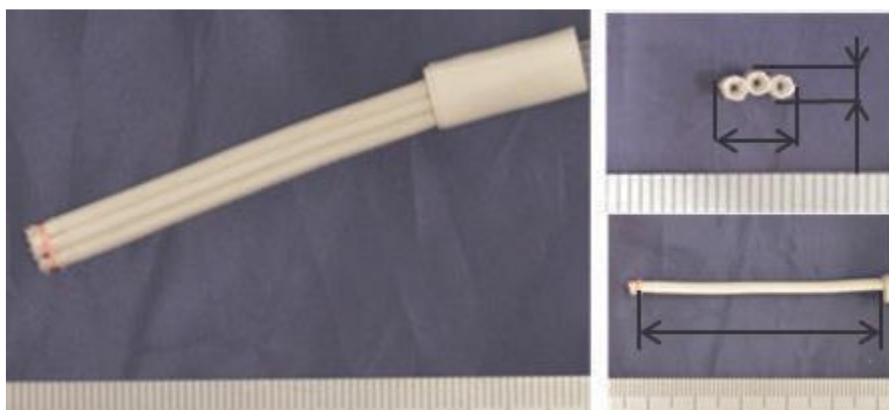
Z důvodu velkého počtu lidí s kontrakturami svalových prstů po mrtvicích, byl vyvinut nový pneumatický pohon pro rehabilitační účely. Pro rehabilitační účely je nutné, aby pneumatický pohon byl schopen nejen flexe a extenze ale i kroucení a protahování prstu. Byly vytvořeny dva modely, jeden pro malíček a jeden pro ostatní prsty obrázek 1.18, pro palec ještě nebyl navrhnut, jelikož vyžaduje komplexnější pohyby než ostatní prsty. Pohon je vyroben ze silikonové gumy KE-1603 a skládá z dvou vzduchových komor kdy každá má vlastní přívod vzduchu. Zařízení zvládá pokrýt přibližně 40% možnosti pohybu prstů a je možné ho použít pro rehabilitační účely.



Obrázek 1.18 Gumový pneumatický pohon. Horní je pro malíček spodní je pro zbytek prstů.

1.13 Tenký gumový pneumatický pohon [30]

Pohon je složen ze tří umělých svalů uložených paralelně vedle sebe, což pneumatickému pohonu umožňuje pohyb se třemi stupni volnosti obrázek 1.19. Použitý umělý sval v tomto pohonu je McKibbenův umělý sval, který se při natlakování stáhne v osovém směru. Rozměr McKibbenova svalu je průměr 2,6 mm a délka 50 mm. Pneumatický pohon je řízen tlakem 250 kPa a svaly se zvládají stáhnout až o 15 % své původní délky.



Obrázek 1.19 Tenký gumový pneumatický pohon, šířka 6 mm, hloubka 2.6 mm a délka 50 mm

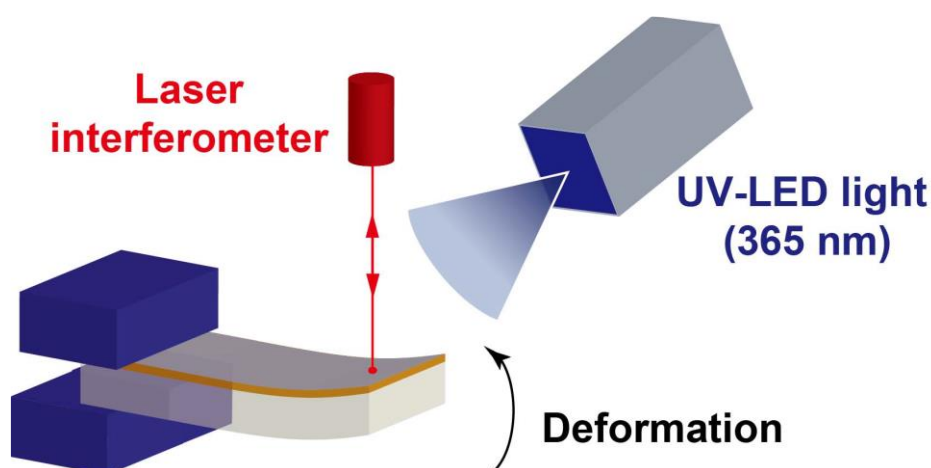
PIEZOELEKTRICKÉ POHONY

Piezoelektrické pohony využívají piezoelektrického jevu, který se vyskytuje u krystalů bez středu symetrie. Piezoelektrický jev je schopnost krystalu generovat napětí při jeho deformaci. Nepřímý piezoelektrický jev je deformace krystalu způsobená vlivem vnějšího elektrického pole. Tento jev se někdy může zaměňovat za elektrostrikcí [19]. Elektrostrikcce se však nachází u všech dielektrik na rozdíl od nepřímého piezoelektrického jevu, který se nachází pouze u piezoelektrických materiálů.

Piezoelektrický jev má velké využití v medicíně, průmyslu, domácích spotřebičích jako jsou tiskárny či pro měření chvění země a budov. Mezi jeden z nejznámějších zařízení využívající, jak piezoelektrický jev, tak nepřímý piezoelektrický jev, je ultrazvuk a například kuřáci využívají tohoto jevu denně v piezoelektrických zapalovačích.

1.14 Piezoelektrický pohon z tenkého filmu ovládaný UV světlem [31]

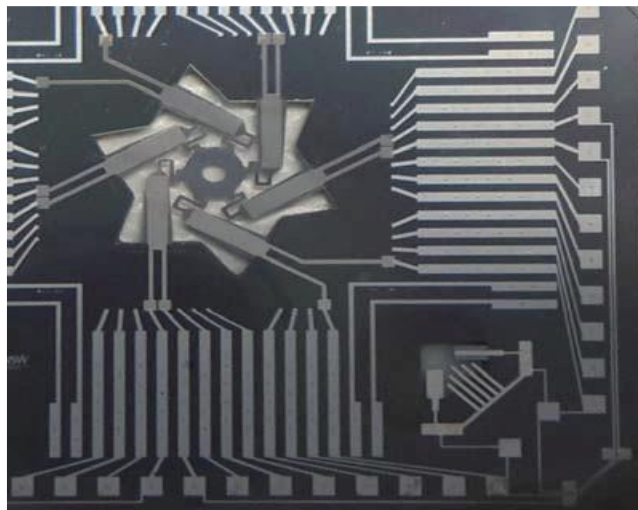
Pohon se skládá z tenkého piezoelektrického filmu PZT uloženého na monokrystalickém substrátu MgO s platinovým povrchem. Rozměry výsledného pohonu jsou šířka 4 mm, délka 18 mm a hloubka 153,35 μm . Při posvícení ultrafialovým světlem na piezoelektrický film PZT objeví se na jeho povrchu napětí ve směru polarizace, které způsobí tlakové napětí v ploše PZT filmu obrázek 1.20. Piezoelektrický pohon je schopem dislokace až 2,1 μm při světelné intenzitě 32 mW/cm^2 .



Obrázek 1.20 Princip měření a deformace piezoelektrického pohonu z tenkého filmu ovládaného UV světlem

1.15 Piezoelektricky ovládaný pohon pro mikroskopické čočky [19]

Pohon je určen pro aplikaci v mikro-optice a je to možná náhrada za VCM pohony. Piezoelektrický pohon vytvořený z polykrystalického křemíkového filmu odpařeného ultra vysokým vakuovým e-paprskem je schopen vysokého zdvihu až 145 μm při malém řídicím napájení obdélníkovým signálem v rozmezí 2-22 V s frekvencí 1 Hz. Pohon je použit pro rychlé ovládání zaostření mikro čočky. Na obrázku 1.21 můžeme piezoelektrické pohony vidět jako obdélníky poskládané do hvězdy okolo mikro čočky.

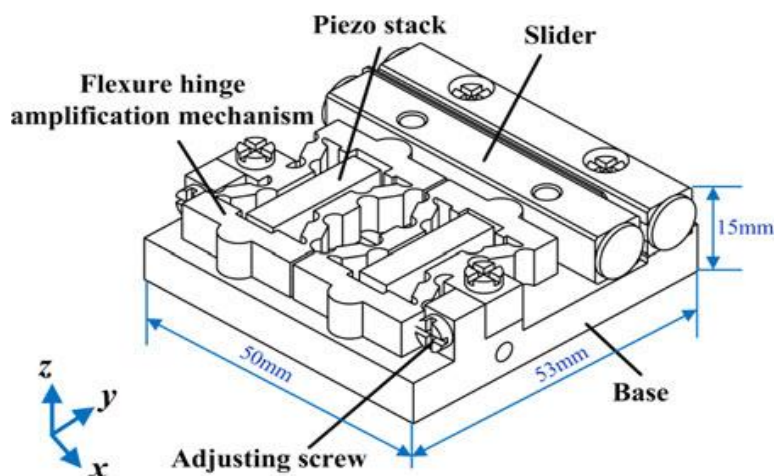


Obrázek 1.21 Rozložení piezoelektrických pohonů bez integrace objektivu

1.16 Parazitní typ piezoelektrického pohonu [20]

Pohon pracuje na parazitickém principu pohybu založeném na LuGre třecím modelu. Skládá se ze základny, posuvníku, dvou piezoelektrických komínků a dvou mechanismů zesílení ohybu můstkového typu viz obrázek 1.22 Schématický model parazitního piezoelektrického pohonu. Pohon využívá parazitního typu pohybu při napájení pilovitým napětím pro získání hrubého dlouhého zdvihu a jemný přesný pohyb je docílen při konstantním napájení. Celý pohon je pak řízen pomocí PID regulátoru, který zajišťuje

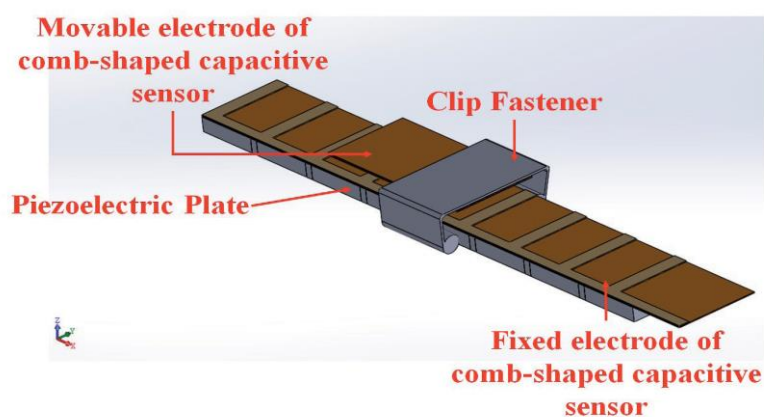
přepínání mezi pilovým a konstantním napětím pro precizní krokové řízení. S tímto pohon pak dosahuje až 100 μm dislokace s přesností na 10 nm. Maximální rychlost je 7,95 mm/s a maximální výstupní vertikální síla je 49 N.



Obrázek 1.22 Schématický model parazitního piezoelektrického pohonu

1.17 Sebe snímací piezoelektrický pohon [21]

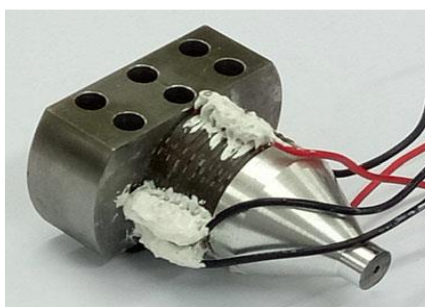
Většina piezoelektrických pohonů je navržena s prostorem pro sensory. Tento prototypový lineární piezoelektrický pohon je navrhnut již se zabudovanými hřebenovými elektrodami, které slouží jako kapacitní senzory pro řízení. Návrh pohonu je inspirován ultrazvukovým lineárním motorem se stálou lichoběžníkovou vlnou. Motor je schopen zdvihu až 33 mm s přesností 10 μm . Model je zobrazen na obrázku 1.23.



Obrázek 1.23 Model sebe snímacího lineárního pohonu

1.18 Jedno pólový lineární piezoelektrický pohon [22]

Motor na obrázku 1.24 využívá nového způsobu krokového pohybu, kdy je poskládaný ze 16 keramických piezoelektrických kroužků s protichůdnými polaritami. Napájením motoru dvěma přerušovanými sinusovými signály posunutými o 90° mezi sebou získáme dva vibrační módy a jejich hybrid vytvoří ekliptický pohyb. Optimální oscilační frekvence je 25kHz. Pohon dosahuje přesnosti 0.21 μm , rychlosti 827,5 mm/s a maximálního tahu 25 N.



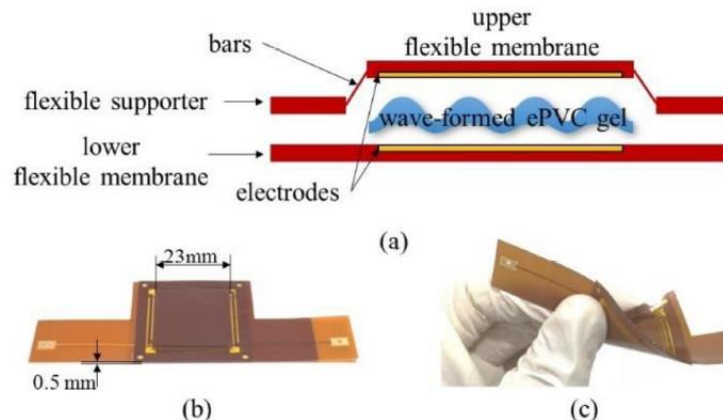
Obrázek 1.24 Jedno pólový lineární motor

MIKRO / NANO POHONY

Mikro a nano pohony jsou aktivní zařízení malých rozměrů se schopností generovat mechanický pohyb pevných nebo kapalných látek transformováním jedné formy energie do kinetické. Velikostně se tyto pohony pohybují v rozmezí nanometrů až mikrometrů. Pro jejich konstrukci se používá MEMS a MOEMS technologií a někdy se tak přímo označují i samotné pohony. Jedním z oborů zabývajících se nano technologií je nanorobotika, vyvíjející nanoboty velikosti molekul. Potenciál využití nanobotů a mikro pohonů je velký, od medicíny po průmysl a kosmonautiku či vojenství.

1.19 Ohebný vibrotaktilní pohon [23]

Pohon navržený pro nositelné a flexibilní elektronická zařízení denního užití. Pohon využívá nového vlnového PVC gelu. PVC gel se po připojení napětí roztáhne a tvoří tak mechanickou práci pohonu. Konstrukci pohonu můžeme vidět na obrázku 1.25. Rezonanční frekvence pohonu je 250 Hz a pohon byl schopen zvednout objekt o hmotnosti 100 g a je tudíž schopen stimulovat lidskou pokožku.

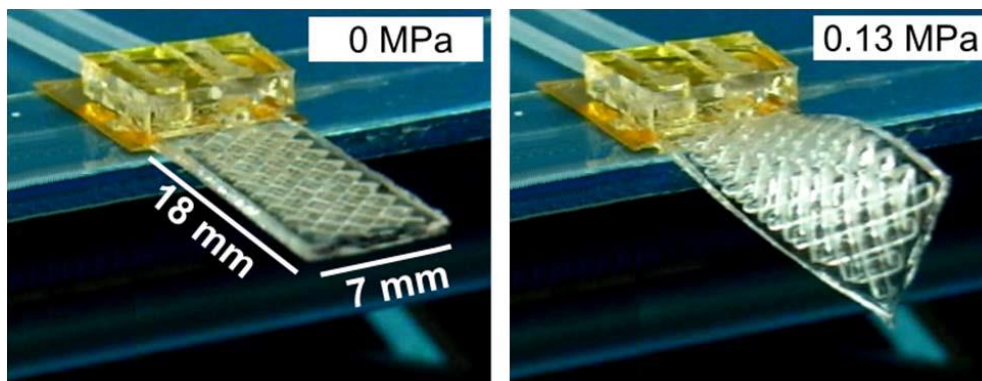


Obrázek 1.25 Model vibrotaktilního pohonu

1.20 Flexibilní pneumatický kroutící pohon [24]

Pohon využívá deformace balónových pneumatických pohonů (PBA), které v sobě obsahují dutiny, který je možný tlakovat a je obklopený poddajnou strukturou. Spojením dvou PBA s opačným směrem ohybu, což vytvoří kroutící pohyb a získáme zmíněný pneumatický pohon, který je vidět na obrázku 1.26. Pro správnou funkčnost musí být

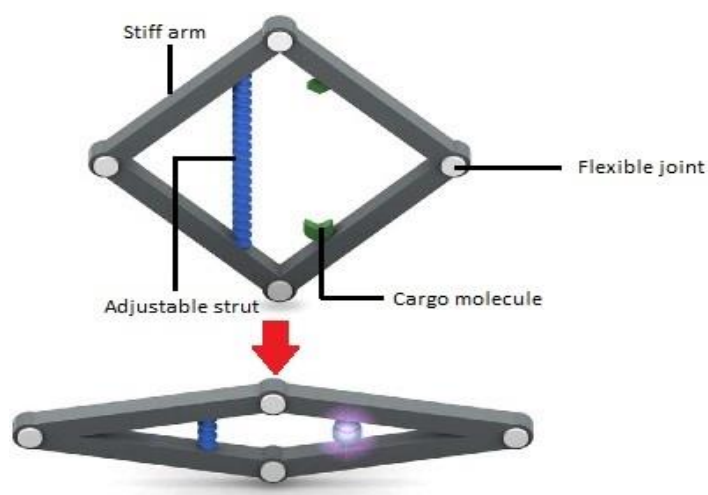
poměr mezi délkou a šířkou PBA pohonu dělitelný 10, dutiny musí být co nejbližší u sebe a zároveň co největší. Při splnění optimálních podmínek pohon generuje $6,5^\circ$ natočení na milimetr délky při tlaku 178 kPa, šířky 7 mm a tloušťky 0.65. Při délce 11 mm je maximální uhel natočení 72° .



Obrázek 1.26 Deformace flexibilního pneumatického pohonu

1.21 DNA origami nano pohon [25]

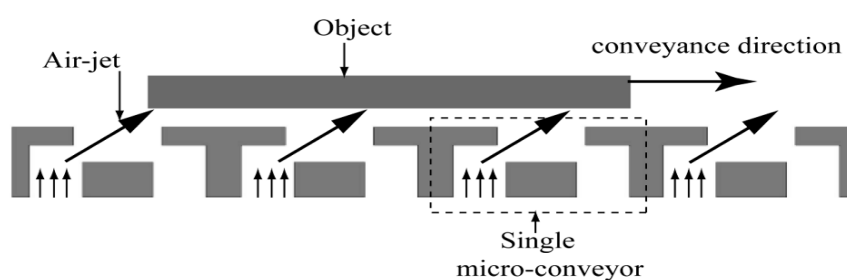
DNA origami pohon používá M13 nosná vlákna a krátká DNA vlákna, které se sami poskládají do finální nano struktury. Struktura se skládá ze čtyř tuhých paží, které jsou spojeny flexibilními klouby a je odolná proti deformaci ohnutím, stříhem nebo torzním stresem. Zařízení je regulováno vzpěrou, která spojuje dvě ramena. Nano molekula je schopna zachytávat nano částice a jejich počet závisí na otevřenosti molekuly. Nano pohon byl schopen i zachytit dva různé proteiny, které fluorescenčně svítí podle vzdálenosti od sebe. Na obrázku 1.27 vidíme konstrukci origami pohonu. DNA origami pohon se může použít ke sledování interakce mezi slabými proteiny či jako kvantitativní platforma pro nízkonákladový test elektroforetické mobility.



Obrázek 1.27 Nano zařízení regulující interakci mezi dvěma nákladními molekulami

1.22Dvourozměrný pneumatický pohon [26]

Jedná se o pohon na silikonové bázi MEMS technologie, který využívá nakloněné vzduchové trysky pro mikroskopickou manipulaci objektů. Dvou dimenzionální systém o velikosti 9 x 9 mm se skládá ze 64 mikro dopravníků a každý dopravník má 4 trysky,

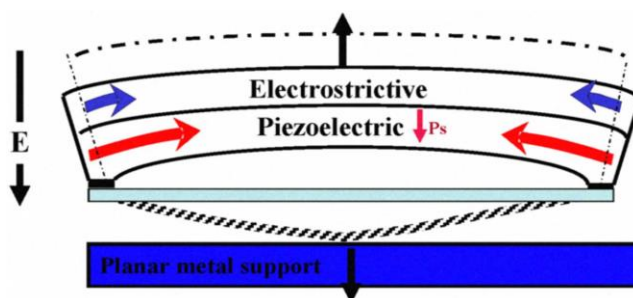


Obrázek 1.28 Princip posunu

které umožňují čtyři směry posunu. Princip posunu je na obrázku 1.28. Systém byl demonstrován na silikonovém čipu s průměrem 3 mm a hmotností 2 mg, který byl posouván pulzy vzduchu o tlaku 20 kPa.

1.23 Dvouvrstvý piezoelektrický/elektrostriční kupolovitý unimorph [27]

Pro mikroskopické a nano pohony je třeba v některých aplikacích až 1000 μm dislokace a toho spousta piezoelektrických keramik a keramik na bázi elektrostriktice nejsou schopny docílit. S touto myšlenkou se šel vyvinout nový pohon využívající kombinace obou materiálů. Dvouvrstvý piezoelektrický/elektrostriční kupolovitý unimorph zkráceně



Obrázek 1.29 BIPEDU při vlivu elektrického pole

BIPEDU se skládá z akční vrstvy piezoelektrika a elektrostričního materiálu v poměru 8:2 slisovaného dohromady, která vytvoří kupoli z důvodu různé teplotní roztažnosti materiálů a následně je kupole spojena s destičkou nerezové oceli viz obrázek 1.29. BIPEDU pohon je schopen dosáhnout 67 μm dislokace při působení elektrického pole 10 kV/cm.

2. PRINCIP A MATEMATICKO-FYZIKÁLNÍ MODEL

Pohon se skládá ze tří silikonových pneumatických pístů uložených v elastomerovém těle. Při zvýšení pneumatického tlaku na tlak vyšší než atmosférický, dochází k expanzi pístu. Expanze pístu je však do všech směrů což je nežádoucí. Z toho důvodu jsou jednotlivé písty obaleny nylonovým vláknem, které potlačuje expanzi do šířky a umožňuje pouze prodloužení pístu. Díky omezení expanze pístu do jednoho směru a sice prodloužení, způsobí prodloužení pístu a elastomerového těla a jeho ohyb, pokud je tlak v jednom či ve dvou pístech vyšší nežli ve zbylém pístu/pístech. Elastomerový pohon se ohýbá směrem, kde se v těle pohonu nachází nejmenší tlak. Při rovnoměrném zvyšování tlaku ve všech pístech zůstává měkký elastomerový pohon ve vzpřímené pozici dochází pouze k prodloužení jeho těla. Pro snížení namáhání povrchu pneumatického elastomerového pohonu je povrch celého těla pohonu pokryt sinusoidou. Tato úprava povrchu pomáhá se snížením a rozptýlením napětí v tahu a ve střihu materiálu při namáhání v ohybu či prodloužení.

2.1 Matematicko-fyzikální model

Pro tvorbu matematického modelu se může využít rovnosti pneumatické síly a síly v tahu v elastomerovém pohonu. Při protažení se síla, kterou působí vzduch v pístu, rovná síle, jenž je tvořena napětím v tahu a je dána vztahem

$$F_p = F_t, \quad [\text{Pa}] \quad (2.1)$$

$$p * S_1 = \sigma * S_2, \quad (2.2)$$

kde F_p je síla pneumatických válců, F_t je síla v tahu, σ je normálové napětí, S_1 je plocha pístu a S_2 je zbylá plocha elastomerového pohonu viz obrázek. Přičemž S_2 se získá ze vztahu

$$S_2 = S - S_1. \quad [\text{m}^2] \quad (2.3)$$

Normálové napětí se dále odvodí z Hookova zákona elasticity za předpokladu nulového smykového tření a pro napětí v tahu je definován vztahem

$$\sigma = E * \varepsilon, \quad [\text{Pa}] \quad (2.4)$$

kde E je Youngův model pružnosti, ε je relativní prodloužení a které se dá vyjádřit vztahem

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l}. \quad (2.5)$$

Následně se vztah (7.3) a (7.5) dosadí do vztahu (7.2)

$$p * S_1 = E * \frac{\Delta l}{l} * (S - S_1) \quad (2.6)$$

a jeho úpravou se získá vztah mezi prodloužením elastomerového pohonu a tlakem který se rovná

$$\Delta l = \frac{p * S_1 * l}{E * (S - S_1)} \quad (2.7)$$

Za předpokladu že při ohybu se jeden píst prodlouží a zbylé dva zůstanou stejné délky může se využít vztahu pro výpočet délky oblouku který pro dva písty s neměnnou délkou je roven

$$l = \frac{\Pi * r}{180} * \varphi, \quad (2.8)$$

a pro píst který se prodlužuje se vypočte délka jeho oblouku z této rovnice

$$l + \Delta l = \frac{\Pi * (r + \frac{3}{2} * r_s)}{180} * \varphi. \quad (2.9)$$

Vztah (7.8) a (7.9) se může dále dosadit do vztahu pro délku oblouku Δl který je

$$l_o = (l + \Delta l) - l, \quad (2.10)$$

po dosazení se získá

$$\Delta l = l_o = \frac{\Pi * \left(r + \frac{3}{2} * r_s\right)}{180} * \varphi - \frac{\Pi * r}{180} * \varphi, \quad (2.11)$$

$$\Delta l = \frac{\Pi}{180} * \frac{3}{2} * r_s * \varphi. \quad (2.12)$$

Výsledný vztah (7.12) se dosadí do vztahu pro prodloužení elastomerového pohonu (7.7)

$$\frac{\pi}{180} * \frac{3}{2} * r * \varphi = \frac{p * S_1 * l}{E * (S - S_1)}, \quad (2.13)$$

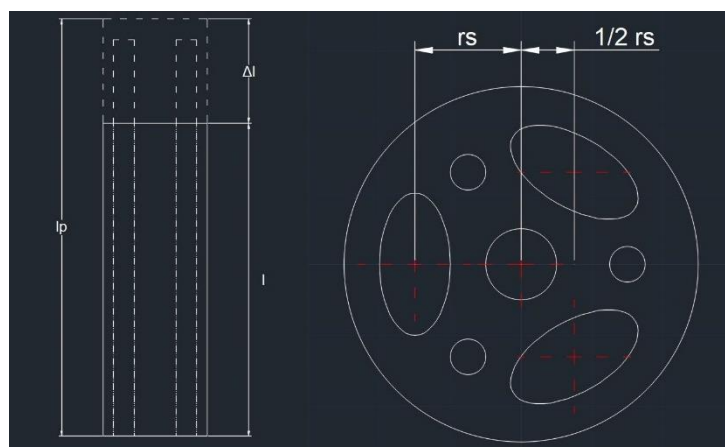
kde jeho úpravou se získá poměr mezi výstupním úhlem ohybu φ a vstupním řídicím tlakem p

$$\varphi = \frac{120 * p * S_1 * l}{\pi * E * (S - S_1)}. \quad (2.14)$$

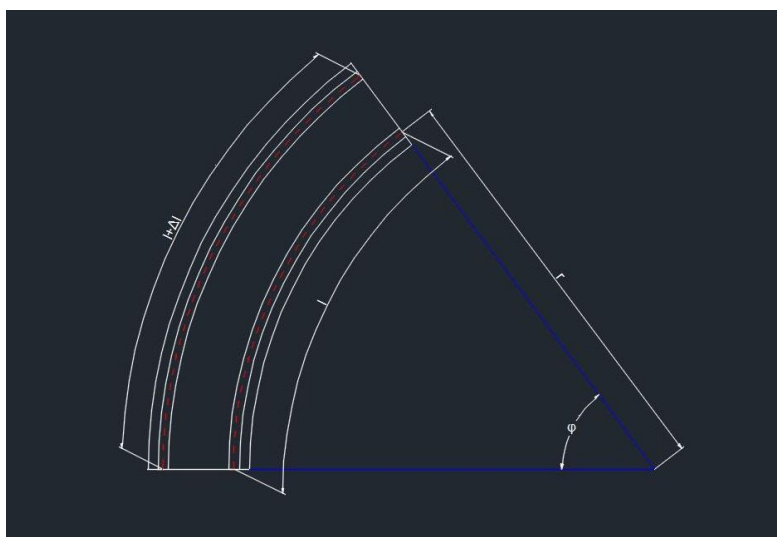
V tomto vztahu poslední neznámá je Youngův modul pružnosti E , který se dá zjistit otestováním finálního elastomerového pohonu kdy se změří jeho prodloužení při natlakování všech pístů. Následně získané hodnoty dosadíme do rovnice pro výpočet Youngova modulu pružnosti

$$\Delta l = \frac{F_t * l}{S_2 * E}, \quad (2.15)$$

$$E = \frac{p * S_1 * l}{(l_p - l) * (S - S_1)}. \quad (2.16)$$



Obrázek 2.1 Rozměry elastomerového pohonu



Obrázek 2.2 Rozměry oblouku v elastomerovém pohonu

3. KONSTRUKCE

Ke konstrukci elastomerového pohonu je zapotřebí namodelovat dvě formy jednu pro tělo elastomerového pohonu a jednu pro měkké pneumatické píсты a zbylé součásti potřebné k odlití a sestavení měkkého elastomerového pohonu. Namodelované součásti se následně připraví k 3D tisku. Po vytisknutí se tyto komponenty následně složí do formy pro pneumatické píсты a formy pro tělo. V těchto formách se odlejí silikonové součásti a taky finální elastomerový pohon. Rozměry pohonu jsou čerpány z literatury [12] a jednotlivé komponenty a formy na odlití se musí velikostně přizpůsobit tiskové ploše 3D tiskárny. K tisku byla využita tiskárna značky Prusa a Creality Ender 3 V2.

3.1 Modelování

K modelování byl využit software SOLIDWORKS, v kterém byl nejdříve vymodelovaná forma pro samotné píсты. Forma viz obrázek 3.1 je rozdělena na dvě poloviny, které jsou ve spodní části zúženy pro centrování elipsovitého středu pístu, zacvakávací centrování pro horní část formy a pěti elipsovitých středů pístu. Rozměry výsledného odlitého pístu jsou šířka 10 mm, výška 200 mm, hloubka 20 mm a tloušťka stěny 1,5 mm.



Obrázek 3.1 Formy k odlití pístů a celého pohonu (vlevo), stojan pohonu, rychlospojky s redukcemi, nylonové vlákno a zaklapávací centrování (vpravo)

Druhá forma viz obrázek 3.1, která slouží ke odlití celého elastomerového pohonu, je složena ze dvou polovin válce, který na vnitřní straně má namodelovaný povrch ve tvaru sinusoidy který zmírňuje napětí ve stěně při prodloužení a ohybu, základny pro uchycení a centrování vložených pístů, které jsou rovnoměrně rozmístěny s úhlem 120° viz obrázek 3.2, čtyř tyček sloužících k redukci materiálu v těle pohonu a poslední součást formy je horní centrování. Tři tyčky mají průměr 5 mm a výšku 200 mm a středová tyčka má průměr 10 mm a výšku 200 mm. Stojan má vnitřní průměr 50 mm a vnější 120 mm a slouží k postavení elastomerového pohonu. Redukce materiálu v těle elastomerového pomohu pomáhá k snazšímu ohybu celého těla.

Výsledné namodelované součástky byly vytištěny z přibližně 400 g kyseliny polymléčné (PLA) materiálu pomocí technologie 3D tisku.



Obrázek 3.2 Složená forma pro odlití těla pohonu

3.2 Sestavení

K odlití pístů se nejdříve složily dvě poloviny formy na píst k sobě a oblepily lepicí páskou k zabránění vytečení silikonu. Následně se do poloviny výšky formy nalil silikon GMS A10 poskytnutý společností DAWEX CHEMICAL s.r.o. a následně se do formy zasunuly jednotlivé středy pístů a zabezpečily ze shora zacvakávacím centrováním. Následovala doba tvrdnutí, která byla přibližně 12 hodin. Poskytnutý silikon tvrdne při

pokojoyé teplotě cca 23 °C. Doba tvrdnutí je možno urychlit vystavením silikonu teplotám okolo 60 °C. Urychlení při vystavení těmto teplotám je v řádu hodin.

Po zatvrdnutí a rozebrání formy se objevila komplikace s vyjmutím středu pístu ze silikonového odlitku a sice že střed téměř nešel vytáhnout a píst se musel srolovat. S touto komplikací hrozila nemožnost vyjmutí středu pístu z finálního odlitku, nebo vyjmutí ale s možností závažného poškození odlitku, z tohoto důvodu se všechny středy vyjmuly hned a jako náhrada se zvolilo brčko s přibližně stejnými rozměry. Brčko bylo vybráno z důvodu jeho snadné deformace, která umožní snadné vytažení z finálního odlitku.

Na takto upravené písty viz obrázek 3.3 se následně navlékl obal z nylonového vlákna a zasadily se do základny formy, která se musela vyrobit nová z důvodu změny středu pístu. Nová základna formy pro tělo elastomerového pohonu se narychlo vyrobila ze dřeva. Do formy se poté zasadily centrovací tyčky. Celý tento svazek se následně uzavřel do válcové formy. Forma se zvenku zalepila tavnou pistolí, aby se zabránilo úniku silikonu. Do takto připravené formy se následně nalil silikon GMS A10 a uzavřel ze shora původní základnou formy, u které se seřízl okraj pro lepší usazení na vrchu formy viz obrázek 3.5.



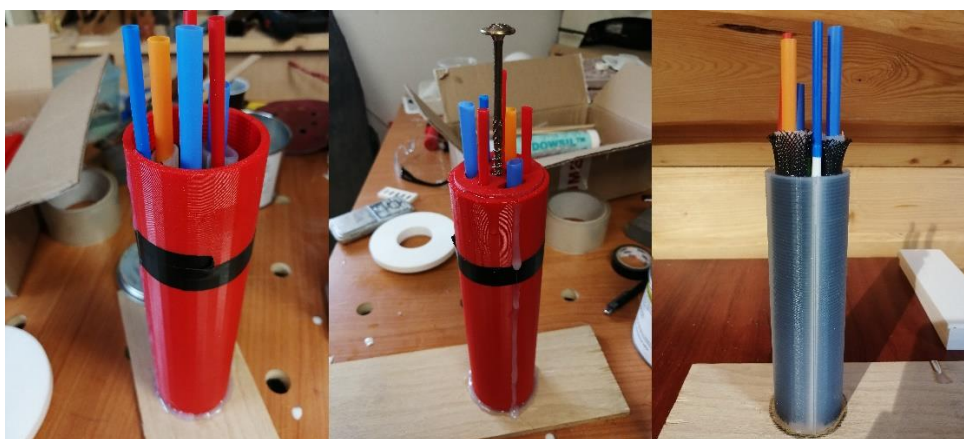
Obrázek 3.3 Píst s vyměněným středem a obalem z nylonového vlákna

Přibližně po 24 hodinách byl pohon vyjmut z formy obrázek 3.5 a kde se zarovnaly přechínající písty. Ale jelikož se nemohly nechat původní středy pístů nebyla možnost odlít i vrchní uzavření pístů najednou a muselo se uzavření odlít zvlášť obrázek 3.4. Pro toto odlití se zaimprovizovalo kávovým kelímkem, který díky svému konickému tvaru udržel tělo elastomerového pístu ve správné výšce, aby se zabránilo vytlačení silikonu u do těla pístů. Po ztvrdnutí této uzavírací vrstvy silikonu se k druhé straně těla

elastomerového pohonu přilepily redukce s rychlospojkami silikonovým lepidlem DOWSIL 732 a po ztvrdnutí lepidla se pohon znovu uzavřel do formy a zalily se redukce s rychlospojkami silikonem GMS A40. Výsledný pohon byl zasazen do stojanu a zalepen.



Obrázek 3.4 Odlevání záslepky vrchu pohonu a přilepení redukcí s rychlospojkami



Obrázek 3.5 Odlití těla pohonu

4. TESTOVÁNÍ ELASTOMEROVÉHO POHONU

Sestavený pohon obrázek 4.1 se připojil ke kompresoru a byl manuálně ovládán pomocí uzavíracích ventilů v předpokládaném rozsahu provozního tlaku 0–2 bar. Pohon měl být testován na maximální prodloužení, maximální ohyb s jedním a dvěma aktivními písty a na citlivost ohybu v závislosti na malých změnách tlaku. Předpokládané chování elastomerového pohonu je prodloužení těla při maximálním tlaku až o 23 %. Pro ohyb je předpokládána možnost ohybu ve všech směrech s maximálním ohybem až 80 % a větší citlivost na změnu řídicího tlak při využití dvou pístů pro tlak nad cca 0,6 bar.

První test bylo otestování prodloužení elastomerového pohonu, který byl proveden puštěním postupně rostoucího řídicího tlaku do všech tří pístů. Výsledkem tohoto testu mělo být změření prodloužení Δl při maximálním tlaku 2 bar, které je potřebné pro výpočet Youngova modulu pružnosti. Během testu při tlaku 1,5 bar nevydrželo silikonové lepidlo, které sloužilo i též jako těsnění redukcí napojených do pístu a následný unik tlaku částečně odtrhl silikon obklopující rychlospojky od zbylého těla pohonu, a i se objevil unik v horní části kde navazuje tělo pohonu na záslepku. Toto poškození se ukázalo jako nevratné, kdy i po zalepení úniku vzduchu na povrchu těla elastomerového pohonu nepomohlo a protržení se znovu otevřelo při tlaku 0,8 bar. Jedinou opravou elastomerového pohonu je jeho kompletně nové odlití všech součástí.

Ve druhém testu se měří ohyb elastomerového pohonu při řízení jen pomocí jednoho pneumatického pístu v rozsahu vstupního řídicího tlaku 0-2 bar. Výsledné hodnoty se porovnají s matematickým modelem. Testování se z důvodu poškození elastomerového pohonu nedá provést a nelze ani spočítat matematický model, jelikož není možnost, jak získat Youngův modul pružnosti pro daný měkký elastomerový pohon, který je třeba získat změřením reálného elastomerového pohonu.

Ve třetím testu se měří ohyb elastomerového pohonu řízeného pomocí dvou pneumatických pístů v rozsahu vstupního řídicího tlaku 0-2 bar. Test má potvrdit předpoklad větší citlivosti na změnu řídicího tlaku pro hodnoty vyšší jak 0,6 bar. Testování se z důvodu poškození elastomerového pohonu nedá provést.



Obrázek 4.1 Sestavený elastomerový pohon

ZÁVĚR

V práci je uvedena variace nových nekonvenčních pohonů, které vznikly od roku 2010. Práce však neobsahuje každý jednotlivý nový nekonvenční pohon, který vznikl, jelikož jejich množství se pohybuje ve stovkách, a z tohoto důvodu je v práci uveden pouze výběr nejzajímavějších pohonů, jenž by i mohli mít v blízké budoucnosti vliv na průlom technologií a užití ve svých specifických kategoriích, jako například zmíněný DNA origami pohon, který se svojí technologií a schopnostmi blíží k nanobotům.

Z tohoto výběru jsem následně vybral měkký elastomerový pohon, který jsem se rozhodl pokusit zkonstruovat. Pro měkký elastomerový pohon jsem sestrojil matematicko-fyzikální model pro vztah mezi úhlem a vstupním tlakem (2.14). Po odvození matematicko-fyzikálního modelu jsem našel literaturu [29] ve které byl pro téže měkký elastomerový pohon matematicko-fyzikální model již odvozen, a tak se mi alespoň potvrdila správnost mého přístupu.

Při konstrukci měkkého elastomerového pohonu nastalo několik problémů, které práci zkomplikovali. Jedním z problémů byla složitost vyjmutí středu z odlitého pístu. Tato komplikace způsobila nutné improvizace při výrobě, které se též nepříjemně projeví na kvalitě konečném výrobku.

Během testování došlo k nenávratnému poškození elastomerového pohonu, kdy při tlaku 1,5 bar nevydrželo těsnění mezi redukcí a pístem. Tato netěsnost způsobila částečné roztržení spoje dvou silikonových vrstev. Z důvodu přetrvávajícího úniku vzduchu je nemožné provést jakékoliv testování na pohonu, a tudíž není možno potvrdit či vyvrátit předpoklady chování pohonu.

Místo, ve kterém k tomu došlo už je od začátku konstrukční slabinou, jelikož nejde zaručit soudržnost dvou silikonů s různou tvrdostí. Dalším negativním vlivem, který ovlivňuje tento spoj jsou domácí podmínky konstrukce, které neumožňují správnou práci se silikonem jako je vytažení bublinek ze silikonu pomocí vakua. Pokud by se měkký elastomerový pohon znovu konstruoval navrhl bych již od začátku přilepit redukce s rychlospojkami k pístům až poté odlévat tělo pohonu. Tím by se zajistila soudržnost silikonu v místě spoje redukce s pístem.

LITERATURA

- [1] CHRISTOPHER, Brianne, 2018. The Elephants of Materials Science: SMAs Never Forget Their Shape. *COMSOL Blog* [online]. [cit. 27.12.2020]. Dostupné z: <https://www.comsol.com/blogs/the-elephants-of-materials-science-smas-never-forget-their-shape/>
- [2] BAO, Ru-bing; LIU, Xiao-xu. *Research on SMA actuator*, Sborník International Conference on Computational and Information Sciences, 2010
- [3] BEHL, Marc; LENDLEIN, Andreas, 2007. Shape-memory polymers. *Materials Today* [online]. Sv. 10, 4. vyd. [cit. 27.12.2020]. Dostupné z: [https://doi.org/10.1016/S1369-7021\(07\)70047-0](https://doi.org/10.1016/S1369-7021(07)70047-0)
- [4] Shen, Q.; Trabia, S.; Stalbaum, T. aj., 2016. A multiple-shape memory polymer-metal composite actuator capable of programmable control, creating complex 3D motion of bending, twisting, and oscillation. *Sci Rep* [online]. 6. vyd., 24462 [cit. 26.12.2020]. Dostupné z: <https://doi.org/10.1038/srep24462>
- [5] CHEN, Tian a SHEA, Kristina, 2018. An Autonomous Programmable Actuator and Shape Reconfigurable Structures Using Bistability and Shape Memory Polymers. *3D Printing and Additive Manufacturing* [online]. 5. vyd. [cit. 26.12.2020]. Dostupné z <https://www.liebertpub.com/doi/10.1089/3dp.2017.0118>
- [6] AHMAD, Manzoor; LUO, Jikui a MIRAFAT, Mohsen, 2012. Feasibility study of polyurethane shape-memory polymer actuators for pressure bandage application. *Science and Technology of Advanced Materials* [online]. 13.svazek, 1. vyd. [cit. 26.12.2020]. Dostupné z: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1088/1468-6996/13/1/015006>
- [7] Goodfellow [online]. [cit. 27.12.2020]. Dostupné z: <http://www.goodfellow.com/larger-quantities/alloys/magnetic-shape-memory-material/>
- [8] AKSOY, Seda, 2010. Magnetic interactions in martensitic Ni-Mn-based Heusler systems. *ResearchGate* [online]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/43606557_Magnetic_interactions_in_martensitic_Ni-Mn-based_Heusler_systems
- [9] SHIEPP, Thomas; PAGOUNIS, Emmanouel a LAUFENBERG, Markus. *Magnetic Shape memory Actuators for Fluidic Applications*, Sborník The 9th International Fluid Power Conference, 2014.
- [10] CHEN, Feijiao; DIRVEN, Steven aj., 2017. Large-deformation Model of a Soft-bodied Esophageal Actuator Driven by Air Pressure. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics* [online]. sv. 22, 1. vyd. [26.12.2020]. Dostupné z <https://ieeexplore.ieee.org/document/7572889>
- [11] Jinhong Yan; Hairong Zhang; Peipei Shi; Xinbin Zhang; Jie Zhao. *Design and Fabrication of Variable Stiffness Soft Pneumatic Humanoid Finger Actuator*, Sborník IEEE International Conference on Information nad Automation, 2018

- [12] ZHANG, Jian; ZHOU, Junjie; AYUAN, Shihua; JING, Chongbo. *Design, Fabrication and Experiments of a 3D-motion Soft Elastomer Actuator*, Sborník IEEE International Conference on Mechatronics and Automation, 2019.
- [13] SASSA, Fumihiko a HAYASHI, Kenshi. *Flexible Thermal Actuator Film for Monolithic Soft Micro Robot*, Sborník IEEE SENSORS, 2018.
- [14] TAJITSU, Y. *Fundamental study on application of piezoelectric chiral polymer to new soft actuator*, Sborník ISAF-ECAPD-PFM, 2012.
- [15] NISHIOKA, Yasutaka; UESU, Megumi; TSUBOL, Hisae; KAWAMURA, Sadao. *Proposal of an Extremely Lightweight Soft Actuator using Plastic Films with a Pleated Structure*, Sborník 19th International Conference on Mechatronics and Machine Vision in Practice, 2012.
- [16] LI, Xiaotao; LIU, Jianfang; LI, Jianqiao. *Theoretical Research and Design of a New piezoelectric/ electrorheological hybrid step actuator*, Sborník The 2nd International Conference on Computer and Automation Engineering, 2010.
- [17] LIU, Changjiang; DOHTA, Shujiro; AKAGI, Tetsuya; ANDO, Ayaka. *Development of Flexible Spherical Actuator Using Flexible Pneumatic Cylinder*, Sborník International Conference on Advanced Mechatronic Systems, 2012.
- [18] KRÁLOVÁ, Magda. Pyroelektrický a piezoelektrický jev. *Techmania Science Center* [online]. [cit. 27.12.2020]. Dostupné z: <https://edu.techmania.cz/cs/encyklopedie/fyzika/elektrostatika/pyroelektricky-piezoelektricky-jev#>
- [19] TANIGUCHI, Hironari aj. *Pneumatic rubber actuators for rehabilitation device to prevent contractures of finger joints*, Sborník 19th International Conference on Mechatronics and Machine Vision, 2012.
- [20] CHEN, Ssu-Han aj. *A Fast Response MEMS Piezoelectric Microlens Actuator with Large Stroke and Low Driving Voltage*, Sborník IEEE 13th Annual International Conference on Nano/Micro Engineered and Molecular Systems, 2018.
- [21] LI, Jianping aj., 2017. Development of a Novel Parasitic-Type Piezoelectric Actuator. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics* [online]. sv. 22, 1. vyd. [26.12.2020]. Dostupné z: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7556278>
- [22] JIANG, Y.-B. a WANG Y.-J. *Design of a Compact and Position Self-sensing Long-stroke Piezoelectric Actuator*, Sborník 16th International Conference on New Actuators, 2018.
- [23] LIU, Junkao aj., 2018. Design and Experiments of a Single-Foot Linear Piezoelectric Actuator Operated in a Stepping Mode. *IEEE Transaction on Industrial Electronics* [online]. sv. 22, 10. vyd. [26.12.2020]. Dostupné z <https://ieeexplore.ieee.org/document/8270708>
- [24] PARK, Won-Hyeong a KIM Sang-Youn. *Film-Type Bendable Vibrotactile Actuator for Mobile Games*, Sbírka IEEE International Conference on Consumer Electronics, 2017.

- [25] GORISSEN, B. aj. *Flexible Pneumatic Twisting Actuators*, Sbírka The 17th International Conference on Solid-State Sensors, Actuators Microsystems (TRANSDUCERS & EUROSENSORS XXVII), 2013.
- [26] KE, Yonggang aj., 2016. Regulation at a distance of biomolecular interactions using a DNA origami nanoactuator. *Nat Commun* [online]. 7. vyd., 10935 [cit. 26.12.2020]. Dostupné z: <https://doi.org/10.1038/ncomms10935>
- [27] YAHIAOUI, Réda aj. *A New Two-Dimensional Actuator for Air Flow Micro-manipulation*, Sbírka First Workshop on Hardware and Software Implementation and Control Distributed MEMS, 2010.
- [28] KIM, K.J. a SHAHINPOOR, Mohsen. *Ionic polymer-metal composites: II. Manufacturing techniques*, Smart Mater. Struct. 12, 65-79, 2003.
- [29] ZHANG, Jian; ZHOU, Junjie; AYUAN, Shihua; JING, Chongbo. Design, Fabrication, Mechanical Modeling, and Experiments of a 3D-motion Soft Actuator for Flexible Sensing, *IEEE Access*, 2020 vol.8, s. 159100-159109, ISSN 2169-3536
- [30] M. Yuzaki; K. Iwata; S. Wakimoto; T. Kanda. *Development of a Thin Pneumatic Rubber Actuator Generating 3DOF Motion – Design Using FEM Analysis and Fabrication of the Actuator*, Sborník 16th International Conference on New Actuators, 2018.
- [31] F. Kurowaka; Y. Oochi; A. Sadanda; Y. Tsuijura; H. Hida; I. Kanno. *UV-light driven piezoelectric thin-film actuators*, Sborník 18th International Conference on Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems, 2015.

SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK

Zkratky:

FEKT	Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií
VUT	Vysoké učení technické v Brně
MEMS	Micro Electro Mechanical Systems
MOEMS	Micro Opto Electro Mechanical Systems
PZT	Piezoelektrická keramická vlákna

Symboly:

A_s	počáteční teplota přeměny martenzitu do austenitu	(K)
A_f	konečná teplota přeměny martenzitu do austenitu	(K)
F_p	síla pístu elastomerového pohonu	(N)
F_t	síla v tahu elastomerového pohonu	(N)
P	tlak	(Pa)
σ	mechanické napětí	(Pa)
S_1	plocha pístu	(m ²)
S_2	plocha průřezu těla elastomeru	(m ²)
E	Youngů modul pružnosti	(GPa)
ε	poměrná deformace	(-)
l	délka elastomerového pohonu	(m)
Δl	prodloužení elastomerového pohonu	(m)
l_p	délka prodlouženého elastomerového pohonu	(m)
l_o	prodloužení oblouku elastomerového pohonu	(m)
φ	úhel ohnutí elastomerového pohonu	(°)

SEZNAM PŘÍLOH

PŘÍLOHA A – Namodelované formy a komponenty pohonu jsou uloženy na přiloženém CD